

## ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ УСЛОВИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ КРУГЛЫХ ИЗДЕЛИЙ

© 2017 г. Г.Л. Колмогоров, А.О. Уткин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

*Статья поступила в редакцию 10.03.16 г., доработана 16.10.16 г., подписана в печать 16.04.17 г.*

Одним из основных широко распространенных способов обработки металлов давлением является прессование, для которого характерна благоприятная схема пластической деформации с преобладающим действием напряжений всестороннего сжатия, что позволяет деформировать малопластичные материалы и сплавы с достаточно большими степенями деформирования. В настоящей работе рассмотрены условия пластического деформирования при гидромеханическом прессовании, как одной из разновидностей процесса прессования. Его отличительной особенностью по сравнению с другими видами прессования является возможность контролировать движение заготовки и предотвращать ее «выстреливание» в конечной стадии процесса. В ходе исследований проведен анализ условий гидромеханического прессования, сочетающего применение рабочей жидкости высокого давления и механическое воздействие технологической оснастки на прессующую матрицу. Получены формулы составляющих общего напряжения гидромеханического прессования, на основании которых определена оптимальная геометрия технологического инструмента. Проведена оптимизация углов конусности матрицы для гидромеханического прессования в зависимости от основных технологических параметров процесса прессования. Построены зависимости отношения напряжения прессования к сопротивлению деформации прессуемого материала от вытяжки, которые подтвердили наличие оптимальных углов конусности прессовых матриц.

**Ключевые слова:** гидромеханическое прессование, оптимизация, геометрия прессового инструмента.

**Колмогоров Г.Л.** — докт. техн. наук, профессор кафедры динамики и прочности машин ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29). E-mail: [dpm@pstu.ru](mailto:dpm@pstu.ru).

**Уткин А.О.** — бакалавр техники и технологии, магистрант той же кафедры. E-mail: [flaymel@yandex.ru](mailto:flaymel@yandex.ru).

**Для цитирования:** Колмогоров Г.Л., Уткин А.О. Энергосиловые условия гидромеханического прессования круглых изделий // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 6. С. 40–44. DOI: [dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-6-40-44](https://dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-6-40-44).

*Kolmogorov G.L., Utkin A.O.*

### Power-energy conditions of round item hydro-mechanical pressing

One of the main widespread methods of metal forming is pressing characterized by a favorable plastic deformation pattern with the predominant effect of all-round compressive stresses. This allows deforming low-ductile materials and alloys with sufficiently high degrees of deformation. This paper studies plastic deformation conditions at hydro-mechanical pressing as one of pressing types. A distinctive feature of hydro-mechanical pressing as compared to other pressing types is the ability to control the movement of the billet and prevent its ejection at the final process stage. The study covers the conditions of hydro-mechanical pressing which combines the use of high-pressure working fluid and the mechanical impact of the tooling on the pressing die. Formulas for the components of the total hydro-mechanical pressing stress are derived to serve the basis for determination of the optimal process tool geometry. Taper angles of the hydro-mechanical pressing die are optimized depending on the main pressing process parameters. The dependency graphs are plotted for the ratio of pressing stress to the resistance of pressed material deformation as a result of drawing that confirmed the presence of optimum taper angles of pressing dies.

**Keywords:** hydro-mechanical pressing, optimization, pressing tool geometry.

**Kolmogorov G.L.** — Dr. Sci. (Tech.), Prof., Department of dynamics and strength of machines, Perm National Research Polytechnic University (614990, Russia, Perm, Komsomolsky av., 29). E-mail: [dpm@pstu.ru](mailto:dpm@pstu.ru).

**Utkin A.O.** — Bachelor of engineering and technology, Postgraduate of the same Department. E-mail: [flaymel@yandex.ru](mailto:flaymel@yandex.ru).

**Citation:** Kolmogorov G.L., Utkin A.O. Energosiловые usloviya gidromekhanicheskogo pressovaniya kruglykh izdelii. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 6. P. 40–44. DOI: [dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-6-40-44](https://dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-6-40-44).

## Введение

Одним из основных и наиболее распространенных способов получения металлоизделий является процесс прессования [1–5]. При производстве

прутковых изделий из труднодеформируемых металлов и сплавов, к которым относится ряд цветных металлов, находит применение гидромехани-

ческое прессование как одна из разновидностей процесса прессования. Как и другие его виды, этот метод характеризуется благоприятной схемой напряженного состояния с преобладающим действием сжимающих напряжений, что способствует повышению пластических свойств обрабатываемого материала и позволяет реализовать значительные пластические деформации без опасности разрушения заготовки [6—14].

Положительным моментом гидромеханического прессования является возможность контролировать движение заготовки и предотвращать ее «выстреливание» в конечной стадии прессования, что характерно для некоторых видов прессования [9, 10]. Данные преимущества позволяют деформировать молибден, вольфрам, тантал, ниобий и др., а также сплавы на их основе, которые имеют низкую пластичность при традиционных методах обработки металлов давлением. Преимущество прессования применительно к тугоплавким металлам — возможность формирования новой структуры, обеспечивающей комплекс высоких физико-механических и эксплуатационных свойств [8].

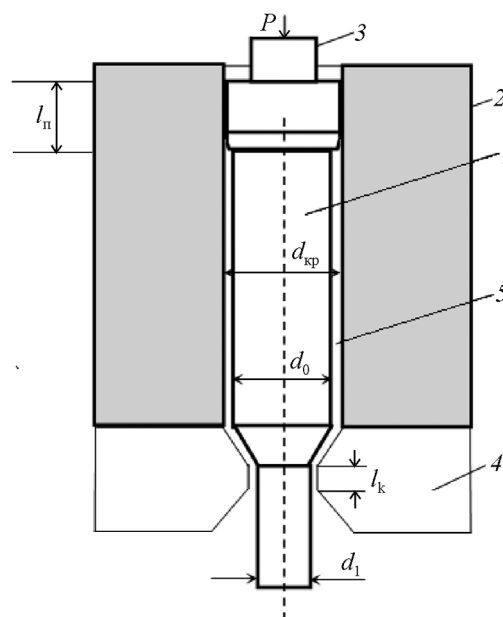
При прессовании, происходящем при комнатной температуре или незначительном подогреве, обеспечивается дробление зерен металла на мельчайшие блоки размером до 0,2—0,3 мкм [14], что приближает данный метод к современным нанотехнологиям. Актуальной задачей при этом является обеспечение минимальных усилий деформирования при максимальных коэффициентах вытяжки.

При оптимизации условий гидромеханического прессования возможно применение современных численных методов, в частности метода конечных элементов [15—17]. Однако его использование применительно к геометрии конических прессовых матриц затруднительно.

Целью работы являлось определение оптимальных значений угла конусности прессовых матриц для гидромеханического прессования, обеспечивающих минимальные усилия прессования, в зависимости от основных технологических параметров.

## Методика исследования

Одной из актуальных проблем гидромеханического прессования является оптимизация геометрии технологического инструмента, обеспечивающей минимальные энергозатраты при прессовании. Схема указанного процесса приведена на рис. 1, и суть его состоит в следующем.



**Рис. 1.** Схема гидромеханического прессования

Пояснения см. в тексте

Прутковая заготовка 1 диаметром  $d_0$  помещается в контейнер 2 с внутренним диаметром  $d_{кр}$  и прессуется с помощью пуансона 3 через коническую матрицу 4 до диаметра  $d_1$  усилием  $P$ . В зазор 5 между заготовкой и контейнером проникает рабочая среда, выступающая также в роли смазки. Это весьма перспективно, поскольку в этом случае зазор, заполненный смазкой, может выполнять функцию ее нагнетателя в зону деформации, обеспечивая при определенных условиях гидродинамический режим смазки с минимальным коэффициентом трения [18].

Основными параметрами, определяющими энергосиловые характеристики гидромеханического прессования, являются усилие прессования, коэффициенты вытяжки и трения в зоне деформации, угол наклона образующей матрицы к оси прессования и сопротивление деформации материала заготовки.

Усилие прессования приводится к среднему напряжению прессования по формуле

$$\sigma_{пр} = P/F_0, \quad (1)$$

где  $F_0$  — площадь сечения исходной заготовки.

Полное усилие прессования определяется суммой отдельных составляющих [19]:

$$P = T_{кр} + T_{м-з} + T_{пл} + T_k, \quad (2)$$

где  $T_i$  — результирующие величины сил трения на поверхности контейнера ( $T_{кр}$ ), контакта прессо-

вой матрицы и заготовки ( $T_{м-3}$ ) и калибрующего пояска матрицы ( $T_k$ );  $T_{пл}$  — усилие, затраченное на пластическую деформацию. Рассмотрим их по отдельности.

Результирующая сил трения на поверхности контейнера равна

$$T_{кр} = \pi d_{п} \tau_{кр} l_{п}, \quad (3)$$

где  $l_{п}$  — длина рабочей части пуансона;  $\tau_{кр}$  — касательные напряжения трения на контакте пуансон—контейнер;  $d_{п}$  — диаметр пуансона.

Между пуансоном и контейнером существует некоторый зазор, через который при прессовании выдавливается излишний объем рабочей среды. Последняя описывается уравнением ньютоновской среды, и для нее среднее касательное напряжение будет равно

$$\tau_{кр} = \mu \frac{v}{h_{п}}, \quad (4)$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость рабочей среды;  $v$  — скорость перемещения пуансона при прессовании;  $h_{п}$  — зазор между пуансоном и контейнером.

Тогда из соотношения (3) с учетом (4) имеем

$$T_{кр} = \pi d_{п} \mu \frac{v}{h_{п}} l_{п}.$$

Данному значению  $T_{кр}$  соответствует напряжение

$$\sigma_{кр} = \mu \frac{v}{h_{п}} \frac{l_{п}}{d_{п}}. \quad (5)$$

Напряжение, затрачиваемое на пластическую деформацию, составит [19]

$$\sigma_{пл} = \sigma_s \int_0^{\varepsilon} d\varepsilon, \quad (6)$$

где  $\sigma_s$  — сопротивление деформации прессуемого материала;  $\varepsilon$  — степень деформации при прессовании.

Средняя по сечению степень деформации в коническом прессовом инструменте определяется коэффициентом вытяжки и дополнительными деформациями сдвига на входе и выходе заготовки из конической матрицы [20]:

$$\varepsilon_{ср} = \ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_m, \quad (7)$$

где  $\lambda = d_0^2/d_1^2$  — коэффициент вытяжки;  $\alpha_m$  — угол наклона образующей конического канала матрицы к оси прессования.

Для оценки усредненного значения сопротивления деформации обрабатываемого материала

определяется напряжение, связанное с пластической деформацией, которое с учетом соотношения (7) будет равно

$$\sigma_{пл} = \sigma_s (\ln \lambda + 0,77 \operatorname{tg} \alpha_m). \quad (8)$$

В свою очередь, проекция результирующей силы трения на ось прессования для конической поверхности рабочей части матрицы выглядит следующим образом:

$$T_m = \tau_m F_m \cos \alpha_m = F_m f \sigma_s \cos \alpha_m, \quad (9)$$

где  $\tau_m$  — среднее напряжение трения на контакте заготовка—матрица;  $f$  — коэффициент трения в зоне деформации;  $F_m$  — площадь поверхности конической части матрицы, контактирующей с поверхностью заготовки.

Из геометрических соотношений для конической части матрицы имеет место уравнение

$$F_m = \frac{\pi d_1^2}{\sin \alpha_m} (\lambda^2 - 1), \quad (10)$$

подставив которое в соотношение (9), получим

$$T_m = f \pi \sigma_s d_1^2 (\lambda - 1) \operatorname{ctg} \alpha_m. \quad (11)$$

При этом составляющая напряжения от сил трения в матрице в общем напряжении прессования будет равна

$$\sigma_m = f \sigma_s \frac{\lambda - 1}{\lambda} \operatorname{ctg} \alpha_m. \quad (12)$$

Результирующая сил трения на поверхности калибрующего пояска матрицы составит

$$T_k = \pi d_1^2 f \sigma_s l_k,$$

где  $l_k$  — длина калибрующего пояска матрицы, откуда следует

$$\sigma_k = f \sigma_s l_k / \lambda. \quad (13)$$

В итоге среднее напряжение гидродинамического прессования будет определяться суммой (5), (8), (12), (13).

При пластической деформации в конических инструментах (волочение, прессование и др.) существуют оптимальные углы конусности, при которых энергозатраты будут минимальны. При гидромеханическом прессовании значения углов конусности матрицы ( $\alpha_m^{\text{опт}}$ ) входят в напряжения  $\sigma_{пл}$  и  $\sigma_m$ , поэтому для их определения используем условие

$$\frac{\partial}{\partial \operatorname{tg} \alpha_m} (\sigma_{пр} + \sigma_m) = 0. \quad (14)$$

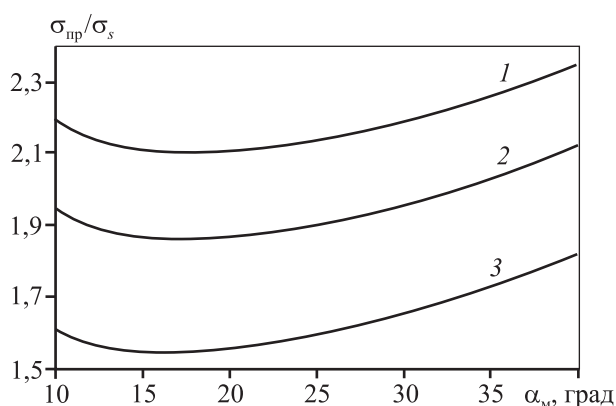


Рис. 2. Зависимость  $\sigma_{\text{пр}}/\sigma_s$  от угла конусности матрицы  
1 –  $\lambda = 5$ , 2 – 4, 3 – 3;  $f = 0,1$

Продифференцировав уравнения (7) и (12) по  $\text{tg } \alpha_m$ , после преобразований получим следующее выражение [15]:

$$\alpha_m^{\text{опт}} = \arctg \left( 1,14 \sqrt{\frac{f(\lambda-1)}{\lambda}} \right). \quad (15)$$

Из него следует, что оптимальное значение угла конусности не зависит от сопротивления деформации, а само соотношение (15) может быть использовано для технологических расчетов гидромеханического прессования. Входящий в данное соотношение коэффициент трения ( $f$ ) достаточно полно изучен для различных пар трения «прессуемый металл — технологический инструмент» и может быть соответствующим образом выбран, например из [21]. Отметим, что соотношение (15) составляет основу патента РФ [22].

## Заключение

Получена формула для определения оптимального угла наклона образующей конуса прессовой матрицы к оси прессования, обеспечивающего минимальное значение усилия прессования, включающего основные параметры процесса прессования металлоизделий, имеющих круглое поперечное сечение.

На рис. 2 приведены расчетные зависимости отношения  $\sigma_{\text{пр}}/\sigma_s$  от угла конусности прессовых матриц для различных значений коэффициента вытяжки ( $\lambda$ ) при прессовании и постоянном коэффициенте трения  $f = 0,1$ . Представленные данные подтверждают наличие оптимальных углов конусности прессового инструмента, обеспечивающих минимальные значения усилия прессования.

## Литература

1. Ping Hu, Ning Ma, Li-zhong Liu, Yi-guo Zhu. Ethods and numerical technology of sheet metal cold and hot forming // Anal. Eng. 2012.
2. Nusheh M., Ahuett H., Arrambide A. (Eds.) Rectnt re-searches in metallurgical engineering: From extraction to forming. Rijeka: InTech, 2012.
3. McQueen H.J., Spigarelli S., Kassner M.E., Evangelista E. Hot deformation and processes of aluminum alloys. Boca Raton: CRC Press, 2011.
4. Tollen G., MacKenzie D. Handbook of Alluminum // Physical metallurgy and processes. N.Y.: Mercel Dekker Ltd., 2003. Vol. 1.
5. Bridgman P.W. The physics of high pressure. London: G. Bell. LDN. Sons Ltd., 1958.
6. Богоявленский К.Н., Вагин В.А., Кобышев А.Н., Петков Г.К., Мамутов В.С., Рис В.В., Рябинин А.Г., Чалев Д.И. Гидропластическая обработка металлов / Пер. с болгар. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние; София: Техника, 1988.
7. Bogoyavlensky K.N., Ris W.W., Suchich W.D. Untersuchung des hydrostatischen extrusionsverfahrens // Fertig. Techn. Betr. 1979. Bd. 29. No. 12. S. 751—753.
8. Колмогоров Г.Л., Михайлов В.Г., Барков Ю.А., Карлинский В.Л. Гидропрессование труднодеформируемых тугоплавких материалов и сплавов. М.: Металлургия, 1991.
9. Береснев Б.И., Езерский К.И., Трушин Е.В. Физические основы и практическое применение гидроэкструзии. М.: Металлургия, 1981.
10. Hill R. Theory of the plastic bulging of a metal diaphragm by lateral pressure // Phil. Sci. 1965. No. 7. P. 539—545.
11. Kachanov L.M. Fundamentals of the theory of plasticity. N.Y.: Courier Dover Publ., 2004.
12. Avitzur B. Metal forming: Processes and analysis. N.Y.: McGraw-Hill Book Co., 1968.
13. Агапитова О.Ю., Залазинский А.Г. Моделирование и оптимизация процесса гидромеханического выдавливания труднообрабатываемых металлов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2014. No. 5. С. 44—49.
14. Мальцев М.Е., Доронькин Е.Д., Езерский К.М. Гидростатическая обработка тугоплавких металлов. М.: Металлургия, 1978.
15. Kato K., Mirota T., Jimma T. // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. 1968. Vol. 34. No. 262. P. 1066.
16. Иванов К.М., Шевченко В.С., Юргенсон Э.Е. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД: Учеб. пос. СПб.: Ин-т машиностроения, 2000.
17. Шемякин Ю.В. Разработка численной модели процесса прессования цилиндрических заготовок из

- алюминиевого сплава с целью использования оптимизационных процедурах // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. No. 10. С. 62—66.
18. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. М.: Metallurgiya, 1986.
  19. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. М.: Metallurgiya, 1964.
  20. Atkins A.G. Hydrodynamic lubrication in cold rolling // Int. J. Mesh. Sci. 1974. Vol. 16. P. 1—19.
  21. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Metallurgiya, 1982.
  22. Колмогоров Г.Л., Кошелев Н.А., Трофимов В.Н., Чернова Т.В. Способ прессования заготовок: Пат. 2526346 (РФ). 2014.
- ## References
1. Ping Hu, Ning Ma, Li-zhong Liu, Yi-guo Zhu. Ethods and numerical technology of sheet metal cold and hot forming. Anal. Eng. 2012.
  2. Nusheh M., Ahuett H., Arrambide A. (Eds.) Rectnt researches in metallurgical engineering: From extraction to forming. Rijeka: InTech, 2012.
  3. McQueen H.J., Spigarelli S., Kassner M.E., Evangelista E. Hot deformation and processes of aluminum alloys. Boca Raton: CRC Press, 2011.
  4. Tollen G., MacKenzie D. Handbook of Alluminum. Physical metallurgy and processes. N.Y.: Mercel Dekker Ltd., 2003. Vol. 1.
  5. Bridgman P.W. The physics of high pressure. London: G. Bell. LDN. Sons Ltd., 1958.
  6. Bogoyavlenskij K.N., Vagin V.A., Kobyshev A.N., Petkov G.K., Mamutov V.S., Ris V.V., Ryabinin A.G., Chalev D.I. Hidroplasticheskaja obrabota metallov (Transl. from bulg.) [Hidroplastic processind of metals]. Leningrad: Mashinostroenie; Sofia.: Tekhnika, 1988.
  7. Bogoyavlensky K.N., Ris W.W., Suchich W.D. Untersuchung des hydrostatischen extrusionsverfahrens. *Fertig. Techn. Betr.* 1979. Bd. 29. No. 12. S. 751—753.
  8. Kolmogorov G.L., Mikhailov V.G., Barkov Yu.A., Karlinskii V.L. Gidropressovanie trudnodeformiruemykh tugoplavkikh materialov i spлавov [Hydro-pressing of hard refractory materials and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1991.
  9. Beresnev B.I., Ezerskii K.I., Trushin E.V. Fizicheskie osnovy i prakticheskoe primenenie gidroekstruzii [Physical bases and practical application of hydro-extrusion]. Moscow: Metallurgiya, 1981.
  10. Hill R. Theory of the plastic bulging of a metal diaphragm by lateral pressure. *Phil. Sci.* 1965. No. 7. P. 539—545.
  11. Kachanov L.M. Fundamentals of the theory of plasticity. N.Y.: Courier Dover Publ., 2004.
  12. Avitzur B. Metal forming: Processes and analysis. N.Y.: McGraw-Hill Book Co., 1968.
  13. Agapitova O.Yu., Zalazinskii A.G. Modelirovanie i optimizatsiya protsessa gidromekhanicheskogo vydavlivaniya trudnoobrabatyvaemykh metallov [Modeling and optimization of the process hydraulic-mechanical squirting of difficult processed metals]. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya.* 2014. No. 5. P. 44—49.
  14. Mal'tsev M.E., Doron'kin E.D., Ezerskii K.M. Gidrostaticheskaya obrabotka tugoplavkikh metallov [Hydrostatic processing of refractory metals]. Moscow: Metallurgiya, 1978.
  15. Kato K., Mirota T., Jimma T. *Trans. Jap. Soc. Mech. Eng.* 1968. Vol. 34. No. 262. P. 1066.
  16. Ivanov K.M., Shevchenko V.S., Jurgenson Je.E. Metod konechnykh jelementov v tehnologicheskikh zadachah OMD [The finite elemebt method in the technological problems of metal forming]. Saint-Petersburg: Institut mashynostroeniya, 2000.
  17. Shemjakin Ju.V. Razrabotka chislennoj modeli processa pressovaniya cilindricheskikh zagotovok iz aljuminievogo splava s cel'ju ispol'zovanija optimizacionnykh procedurah [Development of a numericl model of the aluminum alloy cylindrical billets forming process to be used in optimization procedures]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk.* 2013. No. 10. P. 62—65.
  18. Kolmogorov G.L. Gidrodinamicheskaya smazka pri obrabotke metallov davleniem [Hydro-dinamic lubrication during the processing of metals by pressure]. Moscow: Metallurgiya, 1986.
  19. Perlin I.L., Rajtbarg L.H. Teorija pressovaniya metallov [Theory of metal pressing]. Moscow: Metallurgiya, 1964.
  20. Atkins A.G. Hydrodynamic lubrication in cold rolling. *Int. J. Mesh. Sci.* 1974. Vol. 16. P. 1—19.
  21. Grudev A.P., Zil'berg Ju.V., Tilik V.T. Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem [Friction and lubrication in thr treatment of mrtals py pressure]. Moscow: Metallurgiya, 1982.
  22. Kolmogorov G.L., Kosheleva N.A., Trofimov V.N., Chernova T.V. Metod pressovaniya zagotovok [Method of pressing blanks]: Пат. 2526346 (RF). 2014.